

# コンクリートの引張強度に及ぼす粗骨材の影響

川 上 英 男\*

## Effects of Size and Quantity of Aggregate on Tensile Strength of Concrete

Hideo KAWAKAMI

(Received Oct. 15, 1971)

The report presents the results of an experimental investigation on the tensile strength of concrete with particular reference on size and quantity of coarse aggregate. Several series of tests were carried out using single-sized aggregates which are in narrow range of size.

It is shown that the larger is pebble and the more aggregate is contained in concrete, the lower is the tensile strength of concrete. These results indicates, as in the compressive strength of concrete, that the tensile strength of one size aggregate concrete can be expressed as a plane in a space coordinate with different position according to the mortar strength and that the tensile strength of ordinary (mixed size aggregate) concrete can be expressed with the strength of each single-sized aggregate concrete and with each aggregate contents in present concrete.

It is also suggested that the concrete has its own tensile strength composition according to the quantity and the size of coarse aggregate.

### 1 序 論

コンクリートは多質の構成体である。巨視的には粗骨材がセメントモルタルに包まれたものであり、そのセメントモルタルは細骨材がセメントペーストに埋め込まれたものである。更に微視的には、セメントペースト自体はセメントゲルと capillary pore の複合体であり、そのセメントゲルはまた針状、箔状の分子によって構成されている。

コンクリートの性状の解明には、これら各々の構成要素についての研究が必要であると共に、構成要素相互間の関係を明らかにすることが不可欠である。

そして、それらの上立って総合的な検討がなされてはじめてコンクリートの力学的性質や破壊機構が明確に把握されることになる。

Cornell 大学における一連の研究は<sup>1-3)</sup> この構成要素の境界層に注目したもので母体モルタルの収縮、ブリージング、骨材の Settlement によってコンクリートには荷重を受ける以前から、骨材と母体の境界層にクラックが存在していること、これが圧縮荷重の増加と共に進展して破壊に至ることが明らかにされ、このき裂の進展と応力度歪度曲線の関連も、つきとめられた。そして更にすすんで接着現象そのものに関して岩質や接着面積の影響なども、たとえば K. M. Alexander や P. Nepper Christensen によって報告されるようになった<sup>4-7)</sup>。

しかし付着の発生と破壊の要因については、それが決して独立のものでなく、互に関連していて、その単独的解明をそのまま実際のコンクリートに適用するのは困難な状況にある。したがって今までこの問題は

\* 建設工学科

S. Walker と D. L. Bloem あるいは W. A. Cordon と H. A. Gillespie の報告<sup>8,9)</sup> に見られるように粗骨材の質や配合という形で取扱われてきた。

しかしながら在来の研究は実用的観点から経済性施工性を重視したもので、骨材にしても集合体そのままを取扱い、粒径にしても最大粒径に着目した程度に止まるものであって、この点境界層の問題に対して粗骨材が持っている本質的性格やその研究結果の普遍性という点では疑問が残る。コンクリートの引張強度に関する小阪、谷川、大田<sup>10)</sup>や P. Nepper Christensen<sup>9)</sup> の報告においても骨材サイズの問題は取扱われていないかまたは最大粒径でとらえられている。

そこで筆者は境界層の微視的問題をふまえた上で、骨材とコンクリート強度の係に再検討を加え、これを工学的観点から巨視的に統括総合することを意図した。すなわち骨材を取扱うにあたっては、集合体としてではなくて、それを構成する各サイズに分析しまずその性格を把握した上で、それらを総合するという方向に進んで、はじめて混合粒集合体の本質が明らかにされるものと思われる。この方針のもとに筆者は粒の大小に関する総括的な強度関係およびこれらが骨材量と関連するときの影響について系統的総合的な検討を行ってきた<sup>11-14, 22-24)</sup>。

そしてコンクリートの圧縮強度について、単一粒径粗骨材コンクリートにあっては圧縮強度は粗骨材の粒径と量によって相異なること、そしてこのコンクリートについては粗骨材の粒径の対数、量、コンクリート圧縮強度を座標軸とした強度曲面が設定できること、また混合粒径粗骨材コンクリートに対しては、この強度曲面を基礎としてその粒度に基づいてコンクリート圧縮強度が決定されるとするいわゆる粗骨材粒度による圧縮強度構成について発表してきた<sup>11, 12)</sup>。

本論ではコンクリートの引張強度についても圧縮強度と同様に強度曲面や粗骨材粒度による強度構成といった考え方が成立つかどうかを検討するものである。その研究方針としては、圧縮強度に関する場合と同様に、コンクリートをマトリックスとしてのモルタルと粗骨材から成立つ複合構成体としてとらえる考え方に立脚し、粗骨材がコンクリート引張強度に及ぼす影響の基本的な特性を抽出する目的で、単一粒径粗骨材を用いたコンクリートにおいて、粗骨材粒径とコンクリート引張強度、また粗骨材量とコンクリート引張強度の関係を検討する。次にこれらを総合して粗骨材がコンクリート引張強度に及ぼす影響の普遍的性格を論ずるものである。

粗骨材としては川砂利と碎石を用いた。

## 2 引張強度試験方法

コンクリートの直接引張試験には、種々の技術的な困難がともなうので、ここでは間接的にコンクリートの引張強度を判定する方法<sup>15-21)</sup>の一つとして割り裂き試験<sup>14)</sup>を採用した。この割り裂きによる引張試験方法にも円柱供試体<sup>16)</sup>や立方体<sup>17)</sup>を用いる方法があり、その載荷方法<sup>17, 18)</sup>についてもいくつかの研究や提案が見られる。ここでは円柱供試体を用いる JIS A 1113 の方法によって引張強度試験を行なった。すなわち図 1 に示すようにコンクリート円柱体の直径上の母線に

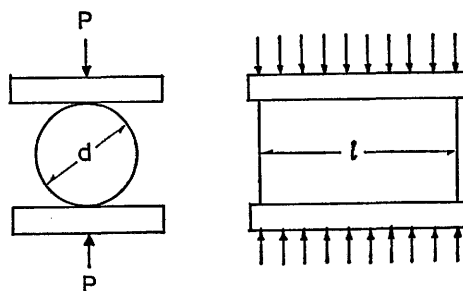


図1 コンクリート引張試験方法

圧縮力を加えて引張破断を生ぜしめる方法である。引張強度は次式で算定する。

$$\sigma_t = (2P / \pi dl) 1000$$

ここに  $\sigma_t$  : 引張強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

P ; 試験機の示す最大荷重 (ton)

d ; 供試体直径 (cm)

l ; 供試体長さ (cm)

## 3 材料および練り混ぜ

セメントは敦賀普通ポルトランドセメントを用いた。JIS R 5201 によるセメントの強度試験結果は各実験毎に当該の表に付記した。砂と砂利は福井県九頭竜川産で性質を表 1 および図 2 に示した。川砂利の岩質構成は表 1 のようであった。岩質によってセメントペーストとの接着力には差があることがいわれている<sup>9)</sup> が、ほぼ同じ%だけ入っているものとして、その差を無視することにした。

粗骨材は篩を用いて 7 段階 (5~8, 8~10, 10~13, 13~16, 16~19, 19~25, 25~32mm) の大きさに分類した。川砂利コンクリートの実験では砂利の都合から、上記粒径区分の隣接したものを混ぜて用い、これを単一粒径として扱った場合もある。表面活性剤は用いなかった。

表1 骨材性質

	平均	標準偏差
ガラス玉直径(mm)	A 16.30 B 12.11 C 11.03	0.32 0.31 0.31
川砂利, 砂の絶乾比重	川 砂 2.52~2.54 川 砂 利 2.60~2.62 碎 石 2.63~2.65	
川砂利の石質構成(%)	安 山 岩 80 流 紋 岩 6 ひ ん 岩 5 花崗内緑岩 5 そ の 他 4	
碎石実績率	58~60%	

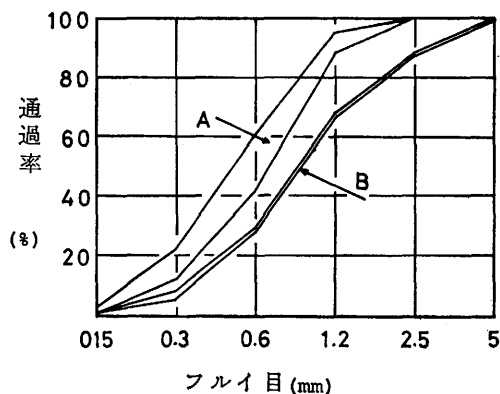


図2 砂の粒度

粗骨材は水洗の後, 数日間水中に浸し, 使用時に布でふいて表面乾燥内部飽水状態として用いた。砂はできるだけ表乾に近い状態で用い, 毎回含水量を測定し

て添加水量を補正した。各実験の調査表は絶乾調査である。

練り混ぜは容量18ℓまたは27ℓのアイリッヒ型ミキサーを用いて3分間行なった。養生は標準水中養生, 材令は28日とした。

#### 4 粗骨材粒径とコンクリート引張強度

水セメント比, 骨材量, 細骨材率など調査の条件を同一とし, 粗骨材粒径だけを変えた比較実験を数種の単一粒径骨材について行なった。

この実験は数種の水セメント比についてそれぞれ行ない, 骨材粒径とコンクリートの引張強度の関係が水セメント比とどのような関連性があるかについても併せて検討する。

実験は文献11に述べたコンクリート圧縮強度についての実験と同時に行なったものであり, 同一バッチのコンクリートを用いて圧縮試験用供試体と引張試験用供試体を製作した。

##### 4・1 川砂利コンクリートの実験

供試体は10φ×20cm円柱供試体2本と7.5φ×15cm円柱供試体1本を各調査に対して製作した。計21本である。

コンクリートの調査と引張強度試験結果を表2に掲げた。粗骨材粒径とコンクリート引張強度平均値の関係を図3に示した。横軸の粗骨材粒径は対数目盛で表わしてあり, 各単一粒径粗骨材の粒径としてはそのふり目範囲の中央値をもって示してある。同図によれば水セメント比が同じでも粗骨材粒径が大きいほどコンクリート引張強度は低下する傾向にある。その低下の割合は水セメント比が小さい場合程大きい。粗骨材粒径が小さい範囲では引張強度が粗骨材粒径に関係な

表2 粗骨材粒径と引張強度(川砂利コンクリート)

重量調合 (kg/m³)				粗骨材径	スランブ	引張強度 F <sub>t</sub>				F <sub>c</sub> F <sub>t</sub>	圧縮強度 F <sub>c</sub>
水	セメント	砂	川砂利	(mm)	(cm)	(kg/cm²) 平均					平均 (kg/cm²)
188	418	630	1100	5-10	7	34.9	40.0	37.1*	37.3	10.5	393
				10-16	13	38.2	32.4	40.0*	36.9	9.2	340
				19-26	18	34.6	35.5	30.5*	33.5	8.8	296
				25-32	19	29.5	35.5	23.4*	29.5	8.9	264
(0.45 : 1 : 1.5 : 2.63)											
178	274	770	1100	5-10	0	23.7	24.1	15.8*	21.2	8.1	170
				10-16	15	22.6	20.0	15.0*	19.2	8.4	161
				19-25	19	17.2	19.6	19.1*	18.6	7.4	137
(0.65 : 1 : 2.81 : 4.02)											

\* 供試体 7.5cmφ×15cm, セメント4週圧縮強度 360kg/cm², 砂は図1のA

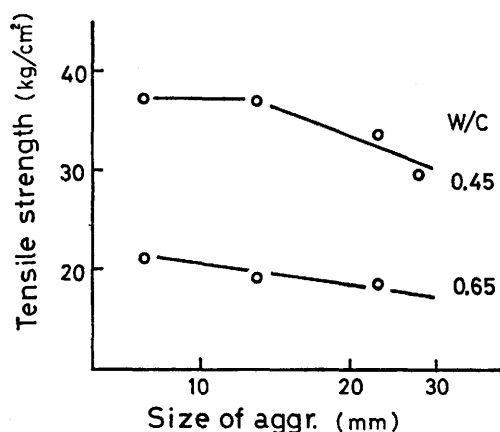


図3 粗骨材粒径と引張強度（川砂利コンクリート）

く一定となる場合があることもうかがわれ、この点圧縮強度について文献11に述べた限界粒径（モルタルマトリックスと同じ強度を示すときの粗骨材粒径の最大値）と同様な意味で引張強度についても限界粒径があり得ることが示されている。この限界粒径をこえた粒径の粗骨材を用いた場合には、コンクリート引張強度と粗骨材粒径の対数とはほぼ直線的関係にあるとみな

すことができる。これは圧縮強度の場合に見られたのと同じ傾向である。圧縮強度と本実験の引張強度から脆度係数を算定して表2に示した。この脆度係数  $F_c/F_t$  は粗骨材粒径が大きいくほど小さくなっている。このことはコンクリート引張強度が粗骨材粒径の増大に従って低下する割合は、圧縮強度における強度低下の割合より小さいことを示している。すなわち粗骨材に起因するコンクリート強度上の欠陥は引張強度における場合の方が圧縮強度における場合より小さく現われると言える。

#### 4・2 碎石コンクリートの実験

コンクリート調合の水セメント比は0.49, 0.56, 0.66の3種類である。圧縮供試体を製作したコンクリートと同一バッチのコンクリートを用いて  $10\phi \times 20cm$  円柱供試体3本づつを各調合に対して製作した。供試体はモルタルだけの場合、混合粒径粗骨材を用いた場合を含め、合計54本である。

コンクリートの調合と引張強度試験結果を表3に示した。また圧縮強度をもとにコンクリートの脆度係数を算定し表3の右欄に示した。

コンクリート引張強度と粗骨材粒径との関係を図4

表3 碎石粒径と引張強度（碎石コンクリート）（ $10\phi \times 20cm$ ）

重量調合 ( $kg/m^3$ )				粗骨材径	引張強度 $F_t$				$\frac{F_c}{F_t}$	圧縮強度 $F_c$	
水	セメント	砂	碎石	(mm)	(kg/cm <sup>2</sup> )			平均	$\frac{F_c}{F_t}$	平均 (kg/cm <sup>2</sup> )	
208    432    644    1020 (0.49 : 1 : 1.49 : 2.36)				Mortar	35.8	38.2	—	37.0	9.1	336	
				5-10	37.7	36.9	37.6	37.4	10.0	372	
				10-16	36.0	35.0	34.2	35.1	10.5	368	
				16-19	35.7	30.8	26.4	31.0	11.2	350	
				19-32	32.3	29.3	32.0	31.2	9.4	294	
				Mix*	33.8	28.4	36.7	33.0	10.9	359	
180    324    815    1006 (0.56 : 1 : 2.52 : 3.10)				Mortar	38.1	37.0	31.2	35.4	9.1	320	
				5-10	33.3	32.8	32.3	32.8	9.5	311	
				10-16	32.5	33.4	33.5	33.1	9.6	318	
				16-19	32.6	31.5	31.6	31.9	9.6	307	
				19-32	29.8	27.1	28.1	28.3	10.0	285	
				Mix*	31.1	32.5	36.8	33.5	9.7	326	
180    271    881    988 (0.66 : 1 : 3.26 : 3.64)				Mortar	28.1	26.1	25.9	26.7	8.5	228	
				5-10	26.7	25.5	25.1	25.8	7.8	202	
				10-16	24.4	25.7	—	25.1	8.5	214	
				16-19	22.2	24.5	25.9	24.2	8.9	215	
				19-32	23.1	24.9	22.9	23.6	9.1	214	
				Mix*	27.4	28.3	20.0	25.2	8.5	214	

セメント 4 週圧縮強度 362~350kg/cm<sup>2</sup>, 砂は図1のB

\*) 5-10 10-16 16-19 19-32 粒径(mm)  
0.38 : 0.32 : 0.18 : 0.20 混合比

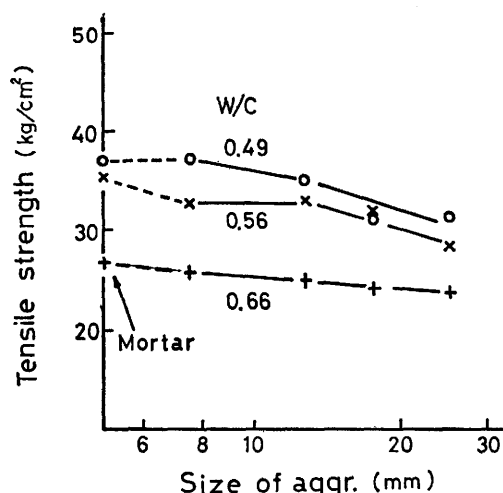


図4 粗骨材粒径と引張強度（碎石コンクリート）

に示した。同図によれば粗骨材粒径が大きくなるほど、引張強度は低下し、その低下の割合は水セメント比が大きいほど小さい傾向にある。この傾向は同碎石コンクリートの圧縮強度と粗骨材粒径の関係において見られたのと同様である。表3に示した脆度係数は水セメント比が0.49の場合は9.1—11.2の範囲にあり、粗骨材粒径と脆度係数との間には一貫した傾向が見られない。水セメント比が0.56と0.66の場合は、それぞれ粗骨材粒径が異なっても脆度係数はほぼ一定の値を示している。すなわち粗骨材粒径の増大にともなって引張強度が低下する値の引張強度値に対する割合は、圧縮強度と粗骨材粒径との関係に見られるのと同じであると言えることができる。

#### 4.3 本章の結論

以上の川砂利コンクリートおよび碎石コンクリートの実験によれば、粗骨材として単一粒径を用いるときは粗骨材の粒径が大きいくほどコンクリートの引張強度は低下することが示された。そしてコンクリートの圧縮強度と粗骨材粒径の関係において見られたのと同様に、限界粒径より粗骨材の粒径が大きい場合には、コンクリート引張強度と粗骨材粒径の対数とはほぼ直線関係にあることが見いだされた。したがって、この両者の関係を単純化すれば、圧縮強度と粗骨材粒径の関係において示した<sup>11)</sup>と同様に図5に示すような関係となる。

すなわちモルタルマトリックスの引張強度を基準として次のような式がたてられる。

$$F_t = F_M' - f_t$$

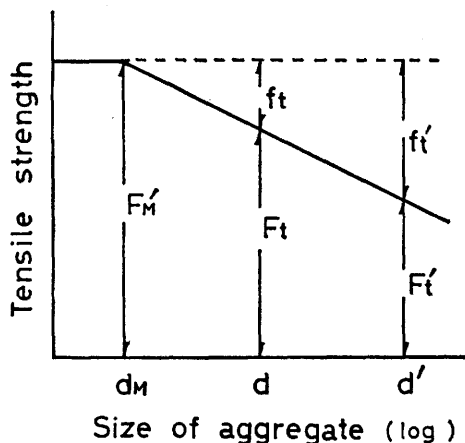


図5 粗骨材粒径とコンクリート引張強度

$$-(F_t - F_t') = \alpha' \log(\phi_M / \phi)$$

ここに  $F_t$  ; コンクリート引張強度

$F_M'$  ; モルタル引張強度

$f_t$  ; 引張強度減少値

$\phi, \phi_M$  ; 粗骨材粒径, 限界粒径

$\alpha'$  ; 母体モルタル, 粗骨材の岩質, 表面状態によって定まる定数

ここにコンクリートは、その引張強度に対しても、粗骨材による欠陥または弱点をもつ複合体と考えることができる。

#### 5 粗骨材量とコンクリート引張強度

単一粒径粗骨材コンクリートにおいて、モルタルの調査を同一とし、粗骨材量を変えたコンクリートの引張強度を試験し、粗骨材含有率とコンクリート引張強度の関係を検討する。

##### 5.1 実験的検討

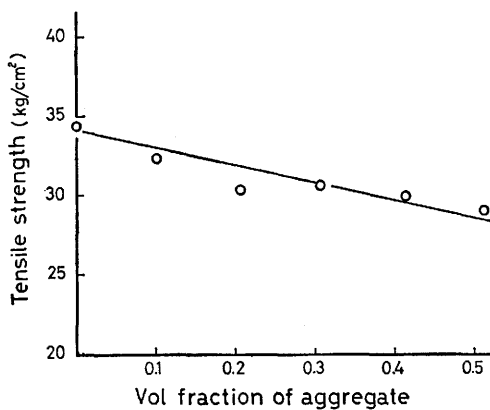
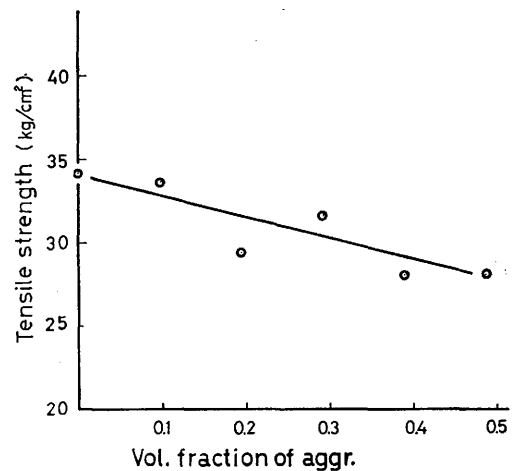
単一粒径粗骨材としては25~32mm, 16~19mmおよび10~13mmの3種の川砂利をそれぞれ単独に用い、コンクリートの粗骨材含有率（絶対容積）は、それぞれ0.513, 0.488, 0.460を最大値として、粗骨材含有率が零（モルタル）までを5等分した含有率とした。そのコンクリート調査を表4に示した。

圧縮供試体を製作したコンクリートと同一バッチのコンクリートを用いて10φ×20cm円柱供試体3本づつを各調査について製作した。モルタル供試体を含めて供試体は合計54本である。

コンクリート引張強度試験結果を表4に示した。またコンクリート引張強度と粗骨材含有率の関係を図6, 図7, 図8に示した。これらの図によれば粗骨材

表4 粗骨材含有率とコンクリート引張強度

No.	川砂利粒 (mm)	粗骨材含有率	スランブ (cm)	引張強度 $F_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )			
				平均			
F 1	25—32	0	—	42.1	31.1	30.1	34.4
F 2		0.103	—	36.3	31.9	29.7	32.6
F 3		0.205	—	32.7	30.0	27.8	30.2
F 4		0.308	19	32.6	30.5	29.1	30.7
F 5		0.414	13	35.3	27.8	26.9	30.0
F 6		0.513	—	33.6	29.3	24.5	29.1
F 7	16—19	0	—	37.8	33.0	31.7	34.2
F 8		0.098	—	36.8	32.8	31.3	33.6
F 9		0.195	—	30.9	30.6	26.8	29.4
F 10		0.292	20	33.6	31.8	29.3	31.6
F 11		0.390	17	30.5	28.4	25.0	28.0
F 12		0.488	15	29.3	29.1	25.5	28.0
F 13	10—13	0	—	41.1	38.3	38.2	39.2
F 14		0.092	—	37.7	36.5	33.3	35.8
F 15		0.184	—	39.9	36.6	29.2	35.2
F 16		0.276	16	33.5	29.8	29.8	31.0
F 17		0.368	14	32.6	32.3	31.3	32.1
F 18		0.460	7	29.4	28.4	26.3	28.0

図6 粗骨材含有率とコンクリート引張強度  
(粗骨材は川砂利25—32mm)図7 粗骨材含有率とコンクリート引張強度  
(粗骨材は川砂利16—19mm)

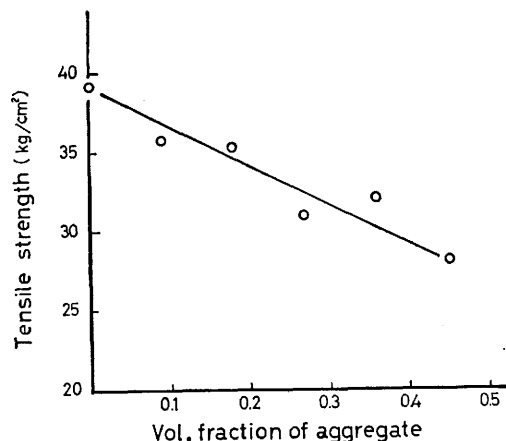


図8 粗骨材含有率とコンクリート引張強度  
(粗骨材は川砂利10—13mm)

含有率が多くなるほど、引張強度は低下し、その強度低下と粗骨材含有率とは巨視的に、ほぼ直線の関係にあるといえる。これはコンクリート圧縮強度と粗骨材含有率の関係<sup>11)</sup>に見られたのと同様の傾向である。

## 5・2 考 察

前項の実験結果を単純化すれば、文献11に述べたコンクリート圧縮強度と粗骨材含有率の関係と同様に、図9に示すような関係を、コンクリートの引張強度と

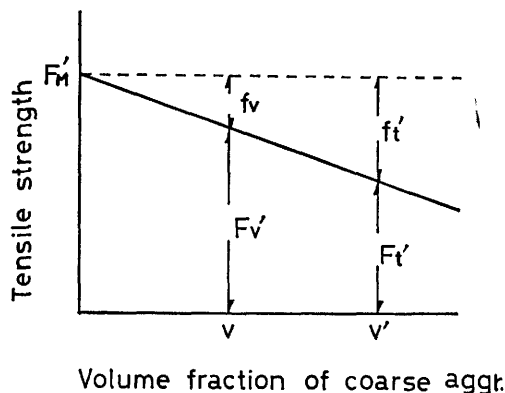


図9 粗骨材含有率とコンクリート引張強度

粗骨材量に対して想定することができる。このことから圧縮強度の場合と同様に、次式をたてることができる。

$$fv/ft' = (F_M' - F_{V'}) / (F_M' - F_{t'}) = V/V'$$

ここに  $V, V'$  ; 粗骨材含有率

$F_M'$  ; モルタル引張強度

$F_t, F_{V'}; V', V$  の粗骨材を有するコンクリートの引張強度

すなわちコンクリートは、その引張強度については粗骨材に起因する欠陥を持つ複合体であり、その欠陥あるいは弱化的程度は粗骨材含有率に比例するとみなすことができる。

## 6 総 括

本論はコンクリートの引張強度に及ぼす粗骨材の影響を論じたものであって、コンクリートをモルタルマトリックスと粗骨材からなる複合体としてとらえ、モルタルの品質を一定に保った条件のもとで粗骨材の粒径や量を変えることによってコンクリート引張強度がどのように相異なるかを実験的に検討した。

まず単一粒径粗骨材コンクリートにおいて、その粗骨材粒径を種々に変えた場合の引張強度を比較した結果、引張強度は粗骨材粒径が大きくなるほど減少し、引張強度と粗骨材粒径の対数とはほぼ直線の関係とみなすことができることを見いだした。これは先に報告した<sup>11)</sup>コンクリート圧縮強度と粗骨材粒径との関係に類似するものである。

次に同一モルタル調査に対して、練り混ぜる粗骨材量を種々に変えた場合のコンクリート引張強度を比較した結果、粗骨材含有率が大きいほど、コンクリート引張強度は低下すること、その強度低下と粗骨材含有率とはほぼ比例することを見いだした。これもまた先に報告した圧縮強度と粗骨材含有率との関係<sup>11)</sup>に類似するものである。

したがってこれら粗骨材含有率および粗骨材粒径とコンクリート引張強度の関係を総合すれば、コンクリート引張強度に対しても、圧縮強度の場合<sup>12)</sup>と同様に、粗骨材粒径、粗骨材含有率およびコンクリート引張強度を座標軸とする空間座標に、単一粒径粗骨材コンクリートの引張強度曲面を設定することができる。そして、それを基本として、一般の混合粒径粗骨材を用いたコンクリートの引張強度に対して、圧縮強度に関して先に報告したと同様に<sup>12)</sup>粗骨材粒度によるコンクリートの強度構成という考え方に発展せしめることも可能である。

しかしながらコンクリートの引張強度試験結果はその強度値に対してバラッキの割合が大きいため、混合粒径粗骨材コンクリートの引張強度に対して、粗骨材粒度による強度構成という考え方に立脚して定量的検討を行なってもさして厳密な結果が得られることは期

待できない。また、コンクリートの引張強度自体が小さいので、粗骨材の粒径や量による強度変化は、さらに少ないものであろう。こういったことから本論では混合粒径粗骨材コンクリートに関する検討は省略する。

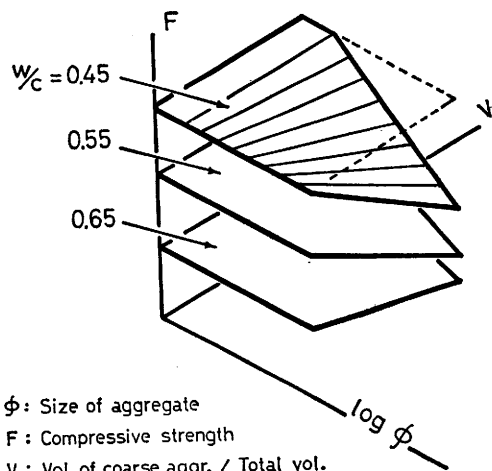


図10 圧縮強度曲面

そしてここではコンクリート引張強度に対しても、図10に示すような圧縮強度の場合<sup>12,13)</sup>と同様に引張強度曲面を描くことができ、またこれをもとに粗骨材粒度による強度構成という考え方を引張強度に対しても適用できる可能性がみられるという結論にとどめておく。

#### 参考文献

- 1) T. T. S. Hsu, F. O. Slate, G. M. Sturman & G. Winter, J. of ACI., Vol. 60, No. 2, pp. 209-224 (1963)
- 2) S. P. Shah & G. Winter, J. of ACI., Vol. 63, No. 9, pp. 925-930 (1966)
- 3) T. T. C. Hsu, J. of ACI., Vol. 60, No. 3, pp. 371-390 (1963)
- 4) K. M. Alexanber, Nature, Vol. 187, No. 4733, pp. 230-231 (1960)
- 5) K. M. Alexander, J. of ACI., Vol. 56, No. 5, pp. 377-390 (1959)
- 6) P. Nepper Christensen, Nordisk Betong, pp. 1-26, Vol. 1 (1965)
- 7) P. Nepper Christensen, & T. P. H. Nielsen, J. of ACI., Vol. 66 No. 1, pp. 69-72, (1966)
- 8) S. Walker & D. L. Bloem, J. of ACI., Vol. 32, No. 3, pp. 283-297, (1960)
- 9) W. A. Cordon & H. A. Gillespie, J. of ACI., Vol. 60, No. 8, pp. 1029-1050 (1963)
- 10) 小坂義夫, 谷川恭雄, 太田福男, セメントコンクリート, No. 284, pp. 9-14, (1970)
- 11) 川上英男, 日本建築学会論文報告集, 第166号, pp. 19-27 (1969)
- 12) 川上英男, 日本建築学会論文報告集, 第167号, pp. 7-11 (1970)
- 13) 川上英男, 日本建築学会論文報告集, 第186号, pp. 1-12 (1971)
- 14) 川上英男, 材料, 第20巻, 208号, pp. 34-40 (1971)
- 15) 赤沢常雄, 土木学会誌 Vol. 29, No. 11, p. 777 (1943)
- 16) F. L. L. B. Carneiro & A. Barcellos, Bul. RILEM, No. 13, (1953)
- 17) B. R. Sen & A. L. Bharara, Indian Conc. Jour. 35-3 (1961)
- 18) S. Nilsson, RILEM Bul. No. 11 (1961)
- 19) V. M. Malhotra, N. G. Zoldners & H. M. Woodrillfe, Mat. Res. & Stnd. pp. 2-12, (1966)
- 20) J. D. Davies, Magz. of Conc. Res. Vol. 20, No. 64, pp. 183-186 (1963)
- 21) 岡行俊, 木山英郎, 平松良雄, 材料, 第18巻, 第191号, pp. 70-76 (1969)
- 22) H. Kawakami, Proc. of 13 th Jap. Congr. on Mat. Res., pp. 207-211 (1970)
- 23) H. Kawakami, Proc. of 14 th Jap. Congr. on Mat. Res., pp. 105-107 (1971) & pp. 102-104
- 24) H. Kawakami, International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Abstracts Vol. 2, pp. 624-626 (1971)

(昭和46年10月15日 受理)